

# Astrosismología de estrellas variables híbridas de secuencia principal

J.P. Sánchez Arias<sup>1,2</sup>, A.H. Córscico<sup>1,2</sup> & L.G. Althaus<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

Contacto / jsanchez@fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / Las estrellas variables híbridas poseen un excelente potencial astrosismológico ya que los modos  $p$  y  $g$  de oscilación excitados simultáneamente en ellas permiten explorar diferentes regiones del interior estelar. En este trabajo presentamos un modelado teórico de cinco estrellas híbridas  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor recientemente descubiertas por las misiones espaciales *Kepler* y *CoRoT*. Para tal fin desarrollamos simulaciones numéricas de la evolución y pulsaciones de modelos representativos de este tipo de estrellas, cubriendo un amplio rango de parámetros (masa estelar  $M$ , temperatura efectiva  $T_{\text{ef}}$ , parámetro de *overshooting*  $\alpha_{\text{OV}}$ , metalicidad  $Z$ ). El enorme banco de frecuencias de oscilación obtenido nos permitió llevar a cabo un detallado ajuste astrosismológico para cada una de las estrellas híbridas seleccionadas. En este trabajo presentamos los resultados obtenidos.

**Abstract** / Hybrid pulsating stars have an excellent asteroseismic potential since they show  $p$  and  $g$ -modes simultaneously excited, that allow to explore different regions of the stellar interior. In this study we present a theoretical modeling of five hybrid  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor stars recently discovered by the *Kepler* and *CoRoT* spacial missions. In order to perform this study we developed numerical simulations of the evolution and pulsations of representative models of these stars, covering a wide range of parameters (stellar mass, effective temperature, overshooting parameter, metallicity). The huge bank of oscillation frequencies computed in this work allows us to carry out a detailed asteroseismic modeling of each of the target hybrid stars.

**Keywords** / stars: oscillations — stars: variables: delta Scuti — stars: variables: S Doradus

## 1. Introducción

Las estrellas  $\delta$  Sct son variables que se encuentran sobre la secuencia principal (SP) cerca de la banda de inestabilidad clásica del diagrama Hertzsprung-Russell (HR) y exhiben modos de pulsación radial y modos  $p$  no radiales con períodos entre 15 min y 5 h que permiten explorar su envoltura. Son estrellas de Población I de tipo espectral A0 y F5, con temperaturas efectivas entre 7000 K y 8500 K, masas estelares en el intervalo  $1.5 - 2.3 M_{\odot}$ , luminosidad en el rango  $5 \lesssim L/L_{\odot} \lesssim 80$  y gravedad superficial en el rango  $3.2 \lesssim \log g \lesssim 4.3$ . Debido a la gran cantidad de modos de oscilación independientes que han sido detectados, a su luminosidad y al gran número de estrellas  $\delta$  Sct conocidas, estas ofrecen una excelente perspectiva para estudios astrosismológicos. Las estrellas  $\gamma$  Dor son en general más frías que las  $\delta$  Sct, con temperaturas efectivas entre 6700 K y 7400 K, con tipos espectrales A7 y F5 y con masas entre  $1.5 - 1.8 M_{\odot}$ . En el diagrama HR están agrupadas en una región cercana al borde rojo de la banda clásica de inestabilidad. Pulsan con modos  $g$  de alto orden radial ( $k$ ) y bajo grado armónico. Sus períodos oscilan entre  $\sim 0.3$  d y  $\sim 3$  d con amplitudes por debajo de  $\sim 0.1$  magnitudes. La estratificación de la composición química de los modelos estelares influye directamente en las propiedades de los modos  $g$ . Dado que los modos excitados en las  $\gamma$  Dor son modos  $g$  de alto orden radial es posible utilizar la teoría asintótica y las desviaciones

del espaciamiento de períodos uniforme para explorar las posibles heterogeneidades químicas en la estructura de los núcleos convectivos (Miglio et al., 2008). Por lo tanto la presencia de modos  $g$  de oscilación en las  $\gamma$  Dor brinda la posibilidad de explorar el núcleo convectivo de estas estrellas. La superposición en el diagrama HR de las bandas de inestabilidad de las  $\delta$  Sct y  $\gamma$  Dor sugiere fuertemente la existencia de las estrellas híbridas  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor, es decir estrellas que presentan pulsaciones de modos  $p$  con altas frecuencias características de las  $\delta$  Sct y simultáneamente oscilaciones de baja frecuencia de modos  $g$  propias de las  $\gamma$  Dor. Estudios recientes realizados sobre una gran muestra de candidatas  $\delta$  Sct o  $\gamma$  Dor muestran que las estrellas híbridas  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor son muy comunes. Debido a la presencia simultánea de modos no radiales  $p$  y  $g$  y modos radiales, el modelado teórico de las estrellas híbridas cuenta con una mayor cantidad de restricciones al momento de elegir el mejor modelo que ajuste a las observaciones permitiendo eliminar la mayor parte de la degeneración de las soluciones. Este hecho hace de las estrellas híbridas  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor un objeto de estudio atractivo para la astrosismología.

## 2. Herramientas numéricas

En este trabajo presentamos el modelado teórico de cinco estrellas híbridas  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor. Para tal fin comparamos los períodos pulsacionales observados con los períodos pulsacionales adiabáticos teóricos calculados

Tabla 1: Datos observacionales de las estrellas consideradas.

Estrella	$T_{\text{ef}}$ [K]	Períodos modos $g$ [s:s]	$\Delta\Pi_g$ [s]
KIC 11145123	8050	[42156.7:71711.34]	2073.6
KIC 9244992	6900	[54000:96000]	2280
HD 49434	7632	[28800:48000]	2030.4
ID 105733033	8000	[59875.2:137635.2]	2655.93
ID 100866999	7300	[23736.26:288000]	3017.9

Tabla 2: Idem Tabla 1.

Estrella	Períodos de modos $p$ [s:s]	Frecuencia de modo radial [ $d^{-1}$ ]
KIC 11145123	[3577.787:5160.673]	17.964
KIC 9244992	[4689.789:7002.188]	12.339
HD 49434	[7180.254:27187.765]	9.3071
ID 105733033	[1363.206:8551.915]	12.6759
ID 100866999	[2544.169:5927.145]	16.9303

sobre un gran conjunto de modelos estelares representativos de estrellas de SP de tipo espectral A-F generados con el código de evolución LPCODE (Althaus et al., 2010) y el código de pulsaciones LP-PUL (Córscico & Althaus, 2006). Variamos la masa entre  $1.2 - 2.2 M_{\odot}$  con un intervalo de  $0.05 M_{\odot}$ ; consideramos cuatro parámetros de *overshooting* ( $\alpha_{\text{OV}} = 0, 0.01, 0.02, 0.03$ ) y tres valores para la metalicidad ( $Z = 0.01, 0.015, 0.02$ ). Variando estos parámetros se generaron en total 252 secuencias evolutivas. Para cada secuencia, que comienza en la *zero age main sequence* (ZAMS) y finaliza en la *terminal age main sequence* (TAMS), calculamos modelos pulsacionales cada 10 K aproximadamente. Estos modelos pulsacionales contemplan modos radiales y modos no radiales con grado armónico 1, 2 y 3 en el rango de períodos de 1200 – 300 000 s. En total fueron computados  $\sim 38\,000$  modelos estelares.

### 3. Estrellas seleccionadas

Las estrellas híbridas  $\delta$  Sct- $\gamma$  Dor que seleccionamos para su modelado teórico son: KIC 11145123 (Kurtz et al., 2014), KIC 9244992 (Saio et al., 2015), HD 49434 (Brunsden et al., 2015), CoRoT 105733033 (Chapellier et al., 2012) y CoRoT 100866999 (Chapellier & Mathias, 2013). En las Tablas 1 y 2 se resumen algunos datos observacionales de dichas estrellas, entre ellos el rango de períodos de modos  $g$ , el rango de frecuencias de modos  $p$ , el espaciamiento de períodos de modos  $g$  ( $\Delta\Pi_g$ ) y la frecuencia del modo radial.

### 4. Metodología

Realizamos nuestros análisis astrosismológicos siguiendo los lineamientos descritos en Kurtz et al. (2014) con el objetivo de seleccionar el modelo que mejor ajusta a las observaciones para cada estrella. El caso ilustrado como ejemplo en las Figs. 1 y 2 es el de la estrella HD 49434. En cada paso descrito a continuación pudimos descartar una gran cantidad de modelos, aquellos

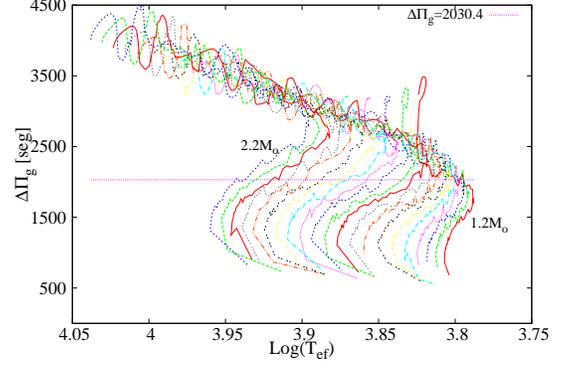


Figura 1: Espaciamiento de períodos promedio vs. temperatura efectiva para modelos con  $Z = 0.01$  y  $\alpha_{\text{OV}} = 0.02$ . La línea recta representa el espaciamiento de períodos promedio observado de modos  $g$  para la estrella HD 49434.

que no reproducen el espaciamiento de períodos promedio en el rango de modos  $g$ , la frecuencia del modo de mayor amplitud, usualmente asociada a un modo radial y los períodos en el rango de modos  $p$ .

- Espaciamiento de períodos promedio de modos  $g$

Como primer paso calculamos el espaciamiento de períodos promedio dentro del rango de modos  $g$  observados para cada uno de los modelos calculados mediante las simulaciones numéricas. Comparamos el resultado con el espaciamiento de períodos promedio de modos  $g$  observado y seleccionamos los modelos más próximos a este valor para cada una de las estrellas seleccionadas. Esta cantidad ( $\Delta\Pi_g$ ) es una restricción importante en la búsqueda de modelos ya que es un excelente indicativo del estado evolutivo de la estrella como puede apreciarse en la Fig. 1. En esta figura graficamos el espaciamiento de períodos promediado en el rango de modos  $g$  para cada uno de los modelos calculados, desde la ZAMS hasta la TAMS para el caso con  $Z = 0.01$  y  $\alpha_{\text{OV}} = 0.02$ . El mismo cálculo se realizó para los demás casos con distintos valores de  $Z$  y  $\alpha_{\text{OV}}$  seleccionando en cada uno los modelos que mejor reproducen  $\Delta\Pi_g$ .

- Modos radiales

A continuación, estudiamos los modos radiales para los modelos que reproducen bien el espaciamiento de períodos promedio de modos  $g$  seleccionados en el paso anterior. Suponemos como es usual, que la frecuencia de mayor amplitud dentro del rango de modos  $p$  está asociada a un modo radial. Este modo radial puede ser el modo fundamental ( $k = 0$ ) o algún armónico ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ). En la Fig. 2 graficamos los períodos de los modos radiales fundamentales y sus armónicos para los modelos seleccionados del caso con  $Z = 0.01$  y  $\alpha_{\text{OV}} = 0.02$  para la estrella HD 49434. Comparando estos períodos con el período del modo de mayor amplitud observado en el rango de modos  $p$ , pudimos reducir el número de posibles modelos sismológicos descartando aquellos modelos que no reproducen el período

Tabla 3: Parámetros obtenidos.

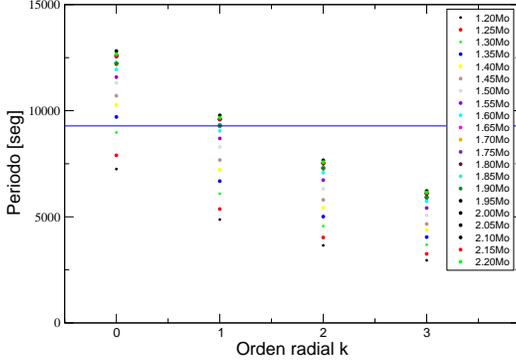


Figura 2: Períodos de los modos radiales de los modelos seleccionados en el paso anterior vs. orden radial  $k$  para el caso con  $Z = 0.01$  y  $\alpha_{OV} = 0.02$ . La línea recta representa el período del modo radial observado para la estrella seleccionada.

del modo radial observado. Al final de esta etapa, hemos retenido como posibles candidatos de modelos sismológicos únicamente aquellos modelos que reproducen el espaciamiento de períodos promedio de modos  $g$  y el período del modo radial observado.

- Ajuste período a período de modos  $p$

Finalmente, con el objetivo de obtener el modelo astrosismológico que mejor representa las observaciones para cada una de las estrellas comparamos una a una las frecuencias de modos  $p$  de los modelos seleccionados en los pasos anteriores con las frecuencias observadas dentro de este mismo rango. La lista de frecuencias de modos  $p$  para cada una de las estrellas seleccionadas aparece en los artículos citados; en la Tabla 2 incluimos el rango de frecuencias de modos  $p$ . El ajuste período a período de modos  $p$  se realizó calculando la siguiente cantidad para los modelos que satisfacen ambas condiciones previas:

$$\chi = \sum_{i=1}^n \frac{[f_{\text{obs}} - f_{\text{calc}}]^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

donde  $f_{\text{obs}}$  es la frecuencia de oscilación de modos  $p$  observada,  $f_{\text{calc}}$  es la calculada mediante simulaciones,  $n$  es el número total de frecuencias dentro del rango de modos  $p$  observadas y  $\sigma_i$  es el error observacional asociado a cada una de las frecuencias. En este paso seleccionamos, entre los modelos elegidos previamente, el modelo que mejor reproduce a todas las frecuencias de modos  $p$ , es decir aquel para el cual esta cantidad  $\chi$  es mínima. Este modelo es el que mejor reproduce el espaciamiento de períodos promedio de modos  $g$ , la frecuencia del modo radial y las frecuencias de modos  $p$ .

## 5. Resultados y discusiones

Pudimos determinar mediante ajustes astrosismológicos algunos parámetros propios de la estructura estelar hasta el momento desconocidos que se resumen en la Tabla

Estrella	Masa [ $M_{\odot}$ ]	Edad [ $10^6$ a]	$T_{\text{ef}}$ [K]	$Z$	$\alpha_{OV}$
KIC 11145123	1.35	3219.022	6064	0.01	0.03
KIC 9244992	2.10	690.941	8150	0.02	0
HD 49434	1.75	1169.08	7399	0.01	0.01
ID 105733033	1.75	1628.43	6169	0.015	0.03
ID 100866999	1.55	1298.32	6778	0.02	0

3 haciendo uso únicamente de los períodos observados y su clasificación sin otra restricción externa como la temperatura efectiva. Los ajustes astrosismológicos presentados fueron posibles realizarlos gracias al carácter híbrido de las estrellas seleccionadas, ya que se hizo uso de la presencia simultánea de modos  $p$  y  $g$  no radiales, como así también de los modos radiales. Los modelos seleccionados satisfacen tres condiciones esenciales en la búsqueda de parámetros que caractericen al interior estelar de estas estrellas; estos modelos son los que mejor reproducen el espaciamiento de períodos promedio de modos  $g$ , la frecuencia del modo radial y las frecuencias observadas dentro del rango de modos  $p$ . Cabe mencionar que en algunos casos existe una diferencia sustancial entre la temperatura efectiva espectroscópica y la obtenida del modelo seleccionado. Es posible que esto se deba a que la clasificación de modos en algunos casos puede llegar a ser muy complicada (por efectos de *avoided crossing* según la etapa evolutiva en la que se encuentre la estrella) y un error en esta clasificación puede introducir errores en los ajustes realizados ya que estos son fuertemente dependientes de dicha clasificación. También cabe destacar que la estrella HD 49434, la cual presenta la mayor diferencia entre la temperatura efectiva observada (7632 K) y la obtenida a partir de los ajustes astrosismológicos (8356 K), exhibe altas velocidades de rotación. El efecto de rotación influye notablemente en el espectro pulsacional de estas estrellas, produciendo un corrimiento del rango de frecuencias de modos  $p$ . Por el momento nuestros modelos no incluyen efectos de rotación sin embargo estamos perfeccionando nuestros resultados mediante una comparación período a período de modos  $g$  y sumando a la temperatura efectiva espectroscópica como un requisito adicional en la selección de modelos.

*Agradecimientos:* Agradecemos a la FCAG, al Proyecto de Incentivos de la UNLP (11/G110), a los miembros del COL y al árbitro por las correcciones realizadas.

## Referencias

- Althaus L. G., et al., 2010, A&A Rev., 18, 471  
 Brunsden E., et al., 2015, MNRAS, 447, 2970  
 Chapellier E., Mathias P., 2013, A&A, 556, A87  
 Chapellier E., et al., 2012, A&A, 540, A117  
 Córscico A. H., Althaus L. G., 2006, A&A, 454, 863  
 Kurtz D. W., et al., 2014, MNRAS, 444, 102  
 Miglio A., et al., 2008, MNRAS, 386, 1487  
 Saio H., et al., 2015, MNRAS, 447, 3264